

第6回超高精度メソスケール気象予測研究会報告

齊藤和雄^{*1}・瀬古 弘^{*2}・露木 義^{*3}
中村晃三^{*4}・青梨和正^{*5}・竹見哲也^{*6}

1. はじめに

第6回超高精度メソスケール気象予測研究会は、海洋研究開発機構、気象研究所、京都大学防災研究所の共催により、2016年3月7日に京都大学宇治キャンパス内防災研究所連携研究棟で開催された。この研究会は、HPCI戦略プログラム（分野3）「防災・減災に資する地球変動予測」の研究開発課題②「超高精度メソスケール気象予測の実証」の成果報告会を兼ねた公開研究会として、2011年から毎年行われてきたものである。HPCI戦略プログラムは、神戸ポートアイランドに設置された理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」の能力を最大限に活用して世界最高水準の研究成果を創出するとともに、計算科学技術推進体制を構築する取り組みを支援するために平成23年度から5年間に亘って実施された文部科学省の補助金研究である。社会的・学術的に大きなブレイクスルーが期待できる分野（戦略分野）として、5つの分野が選定された。このうち分野3は、海洋研究開発機構が代表機関となって「防災・減災に資する地球変動予測」研究として、1）防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究と2）地震・津波の予測精度高度化に関する研究が行われた。「超高精度メソスケール気象予測の実証」は、前者の気象予測研究の研究開発課題として、海洋研究開発機構と気象研究所が中心となり、東京大学・

京都大学・東北大学・名古屋大学・神戸大学・琉球大学・防災科学技術研究所などが参加して行われたものである。HPCI戦略プログラムの5つの科学目標や、分野3の他の研究開発課題については、前回の報告（齊藤ほか 2015）に記述している。

「超高精度メソスケール気象予測の実証」では科学目標として、

- 目標①：領域雲解像4次元データ同化技術の開発
- 目標②：領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証
- 目標③：高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

の3つを定め、集中豪雨や台風、局地的大雨など災害につながる顕著現象の予測精度向上に関する研究が行われた。これらの科学目標は、数値モデルとその初期値、予報誤差の評価などで互いに密接に関係している。

「超高精度メソスケール気象予測研究会」は、2011年から毎年行われてきたもので、第1回から第4回までは神戸で、2015年の第5回は名古屋で開催した（第1表）。6回目の今回は戦略プログラム最終年度の最後の研究会としてこれまでの研究成果の総括を含めて第2表に示すプログラムに沿って京都大学防災研究所で開催した。基調講演者として、米国国立大気研究センターからGeorge Bryan博士を招聘し、約60名の参加者があった。第1図に今回の研究会のチラシで用いた図を、第2図に集合写真を示す。以下には、2章に各セッションの概要を、3章に成果と今後の課題を記す。

^{*1} (連絡責任著者) Kazuo SAITO, 気象研究所/海洋研究開発機構, ksaito@mri-jma.go.jp

^{*2} Hiromu SEKO, 気象研究所/海洋研究開発機構。

^{*3} Tadashi TSUYUKI, 気象大学校/気象研究所。

^{*4} Kozo NAKAMURA, 海洋研究開発機構。

^{*5} Kazumasa AONASHI, 気象研究所。

^{*6} Tetsuya TAKEMI, 京都大学防災研究所。

© 2016 日本気象学会

第1表 超高精度メソスケール気象予測研究会の開催実績。

	開催日	場所	基調講演者	挨拶者、備考
第1回	2011年 6月2-3日	理化学研究所計算科学研究機構（神戸）		東日本大震災により延期開催
第2回	2012年 3月22日	理化学研究所計算科学研究機構（神戸）		
第3回	2013年 3月21日	ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター	Ming Xue（米国オクラホマ大学） SongYou Hong（韓国延世大学）	瀬上哲秀 （気象研究所長）
第4回	2014年 3月7日	神戸国際会議場	Brian Golding（英国気象局） 井口享道（米国メリーランド大学）	川口悦生 （文部科学省計算技術推進室長）
第5回	2015年 3月9日	名古屋大学 ES 総合館	David Stensrud （米国ペンシルバニア州立大学）	永田 雅 （気象研究所長）
第6回	2016年 3月7日	京都大学防災研究所	George Bryan （米国国立大気研究センター）	寶 馨 （京都大学防災研究所長）

第2表 第6回超高精度メソスケール気象予測研究会のセッションプログラム。

9:00-9:20	HPCI 戦略プログラム分野 3	今脇資郎（海洋研究開発機構）
	超高精度メソスケール気象予測の実証	斉藤和雄
9:20-10:40	領域雲解像 4 次元同化システムの開発	（座長 青梨和正）
11:00-12:40	領域雲解像アンサンブル予報解析予報システムの開発	（座長 瀬古 弘）
13:40-13:50	挨拶	寶 馨
13:50-14:30	基調講演	George Bryan
14:30-17:00	高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究	（座長 中村晃三）
17:00-17:30	総合討論	（司会 斉藤和雄）



第1図 第6回超高精度メソスケール気象予測研究会のチラシに用いられた図。

2. 研究会の概要

2.1 オープニング

研究会の冒頭に、戦略プログラム分野3「防災・減災に資する地球変動予測」の統括責任者である海洋研究開発機構の今脇資郎特任参事が、戦略プログラム分野3についての研究説明を行った。今脇参事は、平成27年度からは、防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究の課題責任者も兼任された。続いて斉藤和雄（気象研究所/海洋研究開発機構）は、「Super high accuracy mesoscale weather prediction」の演題で、気象庁メソ数値予報と降水短時間予報の精度の変遷や強雨予測の課題、「超高精度メソスケール気象予測



第2図 集合写真.

の実証」でのこれまでの取り組みについてレビューした。

(斉藤和雄)

2.2 領域雲解像4次元データ同化システムの開発

このセッションでは、集中豪雨、局地的大雨、竜巻などを高精度に予測するための雲解像データ同化に関する研究が発表された。

まず、青梨和正（気象研究所）が、本目標の概要を説明し、続いて雲解像モデル用のアンサンブル予報を使った変分同化法（EnVAR）スキームの開発について発表した。彼は、雲解像モデルの降水物理量のサンプリング誤差抑制のために、2スケール分離とNeighboring Ensemble法を開発した。この同化スキームを用いて、2015年9月8日の台風18号の事例について、JAXAの打ち上げたGCOM-W衛星のマイクロ波放射計AMSR2の観測データの同化実験を行った。その結果、台風の南東側の海上を加湿したことにより、9月9日に関東付近に現れた平成27年関東・東北豪雨に関連する降水バンドが実況に近づいた。

川畑拓矢（気象研究所）は、雲解像モデルに二重偏波レーダーのデータを同化するために、二重偏波レーダー観測演算子の種々の計算手法を比較した。これらの手法は、雲解像モデルの物理量からレーダー観測データを計算するときに、マイクロ波の放射伝達方程式を計算するものと、レーダー観測に基づく関係式を使うものに大別される。観測データとの統計的比較の結果、放射伝達方程式を計算する前方計算法が、より

誤差が小さいことが示された。しかし、この手法でも誤差がまだ大きいので、今後の改良が必要である。

横田 祥（気象研究所）は、観測空間での局所化を適用したEnVARスキームの開発について発表した。彼は、このスキームを用いて、2013年7月18日に東京付近で発生した局地的降水の事例で、同化実験を行った。稠密な可降水量とゾンデの観測データのインパクトを調べたところ、両者共に降水予報の改善に寄

与することが分かった。この事例では、EnVARとLETKF（局所アンサンブル変換カルマンフィルタ）の降水予報の差は小さかった。また、降水予報と初期値の相関から、下層の水蒸気量と収束が局地的な降水を強くしていることがわかった。

山口弘誠（京都大学防災研究所）は、Xバンドのマルチパラメータレーダー（XRAIN）の観測データの雲解像モデルへの同化について発表した。この発表では、2012年7月15日に近畿地方で発生した、線状降水帯の事例について報告された。XRAINの反射強度とドップラー速度の同化によって、線状降水帯の風下部分が良く予報されるようになった。これに、XRAINの固体降水の情報を同化することで、線状降水帯の風上部分の予報も向上した。

伊藤耕介（琉球大学）は、気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）を用いたハイブリッドデータ同化システムの極端現象の予報について報告した。このシステムでは、4次元変分法で用いる背景誤差共分散行列として、NMC法による計算値とLETKFによる計算値の重み付き平均を使う。台風についての62例の予報の比較から、進路予報、強度予報共に、ハイブリッドシステムが、従来の4次元変分法よりも予報精度が良いことが分かった。また、集中豪雨（104事例）についても、ハイブリッドシステムが、従来の4次元変分法よりも、降水予報のフラクシオンスキルスコアが向上している。

Le Duc（海洋研究開発機構）は、JMA-NHMを用いた4次元変分法に3種類のハイブリッドデータ同

化手法を導入し、その解析値、予報を4次元変分法やLETKFと比較した。これらのハイブリッドデータ同化手法は、解析値の大規模場にはインパクトを与えず、小スケールのノイズを減らし、メソスケールの有用な情報を維持している。降水予報を比較すると、4次元変分法で用いる背景誤差共分散行列として、NMC法による計算値とLETKFによる計算値の重み付き平均を使う手法が最も精度が高かった。

(青梨和正)

2.3 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発

このセッションでは、目標②「領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証」の参加者により、平成27年度の成果が報告された。この目標は、「京」の計算資源を活用して雲解像モデルによるアンサンブル予報を行うとともに、データ同化を含めた領域解析予報システムを構築して、集中豪雨などの顕著現象に対する予測精度の検証、定量的確率予測の可能性の実証、さらにアンサンブル予報の予測結果を用いた洪水予測モデル等の検証を行うものである。

まず、本セッションの最初に、瀬古 弘（気象研究所/海洋研究開発機構）が、「領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証」という表題で、目標②の目的や、これまでに分野3ホームページ(<http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/> 2016.8.30閲覧)で紹介されている主な成果、今回発表できなかった課題参加者の成果を紹介した。

次に、國井 勝（気象研究所）は「NHM-LETKFを用いたひまわり8号のラピッドスキャン同化実験」というタイトルで講演を行った。ひまわり8号の2.5分毎という高頻度観測で得られた大気追跡風(RS-AMV)の同化実験を行い、平成27年関東・東北豪雨を引き起こした降水域の位置がより観測に近くなったこと、RS-AMVの同化によって明瞭になった相模湾での下層風の収束が降水域の位置の改善に寄与していることを示した。

陳 桂興（中国中山大学）は「Improving local weather forecast over complex surfaces using a building-resolving urban-scale prediction system」という表題で、LETKFを用いて得た解析値からダウンスケールして再現した海風（第1図左下）の形状が重力流に似ていることや、ビルなどの構造物がある場合の重力流先端付近の詳細な流れを示した。

福井 真（東北大学/気象研究所）は「従来型観測のみによる日本域を対象とした長期領域再解析システム構築に向けた研究」という表題で、地上や高層観測等の従来型観測データのみをLETKFに適用して作成した長期間の再解析の精度や、解析作成時における境界条件の重要性について報告した。

大泉 伝（海洋研究開発機構/気象研究所）は「京コンピュータを用いた広域・超高解像度数値予報」というタイトルで、2013年10月に台風26号に伴って伊豆大島に土砂災害を発生させた降水帯について、「京」に最適化したJMA-NHMを用いて、広域を対象とした超高解像度実験の(1)解像度、(2)乱流クロージャモデル、(3)計算領域の規模、(4)島の地形を変えて調べた豪雨の予測精度への影響を報告した。

山敷庸亮（京都大学総合生存学館）は「山岳地域土砂災害予測のためのHydro-Debris 2Dと3Dの開発・改良」という表題で、「京」用に改良した2次元の土石流モデル「Hydro-Debris 2D」を伊豆大島・広島の土石流事例に適用した結果を示し、広域には実際に発生した溪谷に土石流の発生が再現されることを報告した。3次元の土石流モデルの「Hydro-Debris 3D」については、土石流の発生した溪谷の初期データを用いた大規模粒子流動計算と、土石流中の岩石等が崩れ落ちる様子を可視化した結果を示した。

小林健一郎（神戸大学）は「京コンピュータを用いた高速/高解像洪水氾濫シミュレーション」という表題で、「京」を用いて計算した淀川水系の洪水のシミュレーション結果や「京」の計算効率、2015年9月に発生した関東・東北豪雨で鬼怒川の堤防の越水や決壊による洪水の様子を示した。

ユ・ワンシク（韓国忠南大学）は「Ensemble rainfall and flood forecasts for severe typhoon event using high-resolution Numerical Weather Prediction model based on NHM-LETKF system」というタイトルで、NHM-LETKFで再現した2013年9月の台風18号通過時の豪雨について、格子間隔10 kmから2 kmにダウンスケールすることによって降水強度や降水域の位置が改善されること、京都府の日吉ダムの放流の信頼度が増したことを示した。

(瀬古 弘)

2.4 基調講演

午後の基調講演に先立ち、京都大学防災研究所を代表して寶 馨同研究所所長によるご挨拶を頂いた。続

いて米国国立大気研究センターの George Bryan 博士から、「Extreme wind gusts in large-eddy simulations of tropical cyclones」という演題での基調講演があった。博士はまず熱帯低気圧の構造と強いハリケーンを対象とする航空機ドロップゾンデによる風速鉛直プロファイル観測の例や統計を示し、しばしば下層で強風が吹くこととそれらの評価は風力発電施設の荷重設計において重要であることに触れ、高解像度シミュレーションの必要性を述べた。博士が開発した CM1 (Cloud Model version 1) と呼んでいる可変格子の雲解像モデルを用いて 3000 km 四方の領域を確保しながら中心付近 80 km 四方の解像度を 31.25 m にまで高解像度化して、いくつかの理想実験を行った。実験の初期条件は軸対称モデルの計算から与えるが、中心域の高解像度領域と外側の低解像度領域の遷移域に乱流摂動を与えるため、周期境界条件の LES から摂動成分を取り出して加えるという操作を行っている。その上で 31.25 m 解像度でのシミュレーションを実行したところ、ハリケーンの眼の内側及び壁雲近くの最大風速付近では風速分布は正規分布的になるが、その

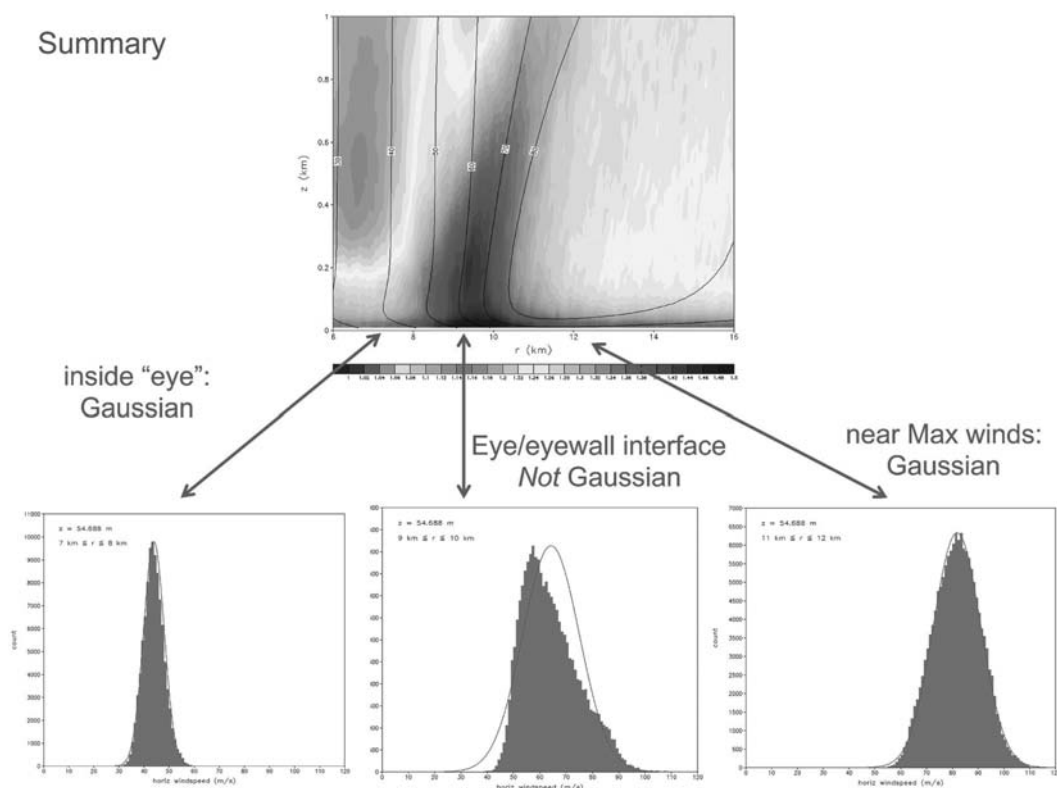
中間に正規分布から大きく外れる領域があることが見いだされた (第3図)。今後ガスト構造の力学について詳しく調べるとともに最小 5 m 解像度までの実験を行い計算結果の収束性を調べる、とのことであった。

(齊藤和雄)

2.5 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

このセッションでは、高精度領域大気モデルを豪雨や竜巻に適用した結果や、モデルに含まれる物理過程 (乱流、雲微物理) の改良に関する研究が発表された。まず、中村晃三 (海洋研究開発機構) が、本目標の研究計画の概要を説明した後、今回の参加者以外の研究成果として、地域気候モデルで再現される山岳積雪の解像度依存性の研究と、台風の多重壁雲の維持メカニズムに関する研究を紹介した。

加藤輝之 (気象研究所) は、2015年広島豪雨の再現実験を行った。解像度依存性を調べ、線状降水帯は水平解像度 2 km でも生成するが、正確な再現には水平



第3図 Bryan 博士基調講演による水平格子間隔 31.25 m の超高解像度シミュレーションによる台風壁雲付近の風速 (上図) および高度 55 m の風速のヒストグラム (下段)。下段の図は左から、眼の内側 ($7 \text{ km} \leq r \leq 8 \text{ km}$)、眼と壁雲の中間域 ($9 \text{ km} \leq r \leq 10 \text{ km}$)、最大風速域付近 ($11 \text{ km} \leq r \leq 12 \text{ km}$) の平均。

解像度250 mが必要で、その解像度を使えば、不安定な成層、強い上昇流、正確な位置での豪雨が再現できることを示した。

益子 渉（気象研究所）は2012年つくば竜巻を対象とした水平解像度10 mの再現実験（第1図右下）の結果を用いて、竜巻がもたらす地表付近の猛烈な上昇流の形成要因について調べ、地表摩擦による収束や、渦度の鉛直勾配に伴う力学的効果によることを示した。

野坂真也（気象研究所）は非静力学地域気候モデル（NHRCM）の風の再現性について調べた。2007年2月の盛岡の1時間ごとのデータについて、JRA55を境界値とし解像度2 kmのNHRCMでダウンスケールを行った結果とアメダスデータを比較し、いくつかの補正方法の結果を示した。

伊藤純至（気象研究所/東京大学大気海洋研究所）は「京」を使い、JMA-NHMを水平解像度100 mとして台風全域を覆う領域（水平サイズ2000 km）でLESとして走らせた結果（第1図左）を用いて境界層内のロール状対流のメカニズムの解析を行い、3つの型の対流が存在することを示し、また、それらの対流による台風全体の構造に対する影響なども指摘した。

杉 正人（気象研究所）は水平解像度2 km～20 kmのグレイゾーンでの積雲対流パラメタリゼーションスキームに関して議論した。熱帯太平洋域での深い対流の解像度1 kmの再現実験結果を正解として、様々な解像度での対流質量輸送などの物理量を計算し、それぞれの解像度でのモデル実験結果との比較を示し、解像度5 kmでも積雲対流パラメタリゼーションが必要であることを示した。

竹見哲也（京都大学防災研究所）はCINDY/DYNAMO期間中の熱帯インド洋の対流と環境の湿度の関係について調べた。下層の相対湿度の増加が上層の雲量の増加をもたらす、対流コアの存在が、周囲の湿潤化に寄与しMJOの発生に影響すると考えられることを示した。

橋本明弘（気象研究所）は、「京」で走らせた多次元ビン法雲微物理過程モデルを用いた再現実験の結果を発表した。JMA-NHMに組み込んだ2次元対流再現実験の結果で、暖気塊の上昇によって発達する積乱雲中の氷粒子のアスペクト比の時間空間変化とあらかじめ与えた昇華成長モードの関係などを示し、実際に観測される氷晶の成長の様子がよく再現できることが

示された。

中村晃三（海洋研究開発機構）は、暖かい雨に関するビン法について、活性化する凝結核の個数密度をエアロゾルの粒径分布と鉛直速度によって決めるパラメタリゼーションスキームを使った結果について示した。

（中村晃三）

2.6 総合討論

総合討論では、斉藤が司会となり、メソスケール気象予測の現状と今後についての議論を行った。第3表は当日用いた英文の表を和訳したものである（一部改変）。今後のテーマとして、データ同化研究では、マルチスケールの効果やハイブリッド法、非線形性の考慮などが、アンサンブル数値予報システムの開発と検証では、ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）の有効利用に向けたシステムの最適化、予報モデルの誤差の考慮、同化研究や高解像度モデル研究・水文モデル開発との連携などが、また、高解像度モデル研究では、LESやビン法モデルによる現実設定のシミュレーション、新しいスキームの開発HPCへのモデルの最適化や可視化など解析ツールの開発などが挙げられた。

（斉藤和雄）

3. 成果と今後の課題

3.1 領域雲解像4次元データ同化システムの開発

局地的大雨や竜巻などの力学的予測の可能性を実証するために、準備研究の期間も含めると6年間、雲解像モデルのためのデータ同化法に関する研究を進めてきた。データ同化という現業的な色彩の濃い分野で、大学・研究機関の研究者と共同研究できたことは、個人的には大きな収穫だったと考えている。

研究の進め方としては、それぞれの参加機関が、独自の工夫を凝らしたLETKF、4DVar、EnVARまたはハイブリッド法に基づくデータ同化システムを開発し、それらを相互比較することによって、雲解像データ同化に関する有用な知見を得ることを目指した。JMA-NHMに粒子フィルタを適用することにも挑戦した。また、マルチパラメータレーダーやドップラライダーなど、先端的な観測データの同化技術も開発した。

特筆すべき研究成果は、LETKFのネストシステムによって、つくば竜巻（2012年5月）の予測可能性を

第3表 メソスケール気象予測研究3つの目標の現状と今後（総合討論で用いられた英文の表を改変，和訳）。

	これまで	今後	どのように
データ同化	メソスケールまたはストームスケール	マルチスケールの扱い	マルチスケールの効果を考慮
	変分法またはアンサンブルカルマンフィルタ	ハイブリッド変分法やアンサンブル変分同化法システム	非線形性や非ガウス性への対応，アンサンブル予報に基づく流れに沿った誤差の考慮
		パラメータ最適化	モデル誤差評価と連動したパラメータ最適化
		粒子フィルタ	多メンバーによるサンプリング誤差の縮小と効率化の工夫
アンサンブル数値予報システム	メソアンサンブル予報（コントロールランの初期値は独立した解析から与える）	データ同化と結びついた雲解像アンサンブル確率予報の評価検証	先端的データ同化手法研究との連携 京コンピュータやポスト「京」機など HPC 解析予測システムの構築
	マルチモデルや物理過程を変えたアンサンブル	LES やビン法モデルなどの詳細モデルに基づく物理過程不確定の評価	誤差情報の評価と高解像モデル実験との連携
	水文モデルの開発	水文モデルによる災害の予測	気象予測に基づく水文モデル計算
高解像度モデル	雲解像モデルに基づく対流パラメタリゼーションの改良	BIN 法モデルに基づくバルク法雲物理過程の改良	新たなスキームの開発
	LES やビン法モデルによる理想実験	LES やビン法モデルによる現実設定での再現実験	HPC に向けたコードの最適化
	ネスティングによる台風や集中豪雨，竜巻の超高解像度実験	台風や集中豪雨，竜巻の広領域超高解像度数値予報実験	HPC に向けたコードの最適化，計算結果解析ツールの開発と可視化

示せたことであろう。レーダー観測と地上観測による稠密なデータを同化すれば，竜巻の発生位置の予測を大きく改善できることがわかった。一方，データ同化システムの相互比較については，必ずしも当初の計画通りには進まなかったが，いくつかのシステムについて個別に相互比較実験が行われ，雲解像モデルに適したデータ同化法について貴重な知見が得られた。これらの成果が，後継プロジェクトであるポスト「京」重点課題においてさらに発展していくことを期待したい。

マスター方程式とベイズの定理を2大原理とするデータ同化は，数値天気予報が対象とするような巨大な非線形システムでは近似的に解くしかない。その際，対象とする現象の物理をよく踏まえることが，高精度のデータ同化法に至る確実な道であろう。そのためにも，データ同化を用いて現象のメカニズムに迫るような研究が，今後もっとなされてよいのではなかろうか。

（露木 義）

3.2 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発

本プロジェクト期間内に，領域アンサンブル解析予報の解像度が数十 km から数 km 以下へと格段に向上した。特に3重にネストした LETKF のシステムを用いた実験では，350 m という高分解能で「つくば竜巻」を引き起こした降水域や強い渦の再現に成功している。同システムで得られた解析値や予報値を，10 m 格子の街区モデルに適用することにより，海風が仙台市に侵入する様子も再現することができた。これらの高分解能化とともに，予測可能性についても，平成24年7月九州北部豪雨の事例を対象にして，優れた研究が行われた。九州北部豪雨の再現に成功した格子間隔5 km の LETKF システムの解析値を初期値に用い，初期時刻を遡らせた複数の延長予報を行った。初期時刻によって50 mm/3時間を超える降水量（豪雨の目安）の確率分布がどのように変化するかを調べた結果，豪雨の発生する24時間前の解析値に豪雨発生の要因が含まれていたことを示すことができた。この実験は，領域アンサンブル予報が豪雨の予測に対して有

効であることを実証しており、特にリードタイム（予報をしてから現象が発現するまでの時間）の研究も可能であることを示したエポックメイキングな成果である。これらの他にも、アンサンブル予報の結果を、河川の流量やダム管理、土石流モデルの入力データとして利用するこれまでになかった応用研究が進められた。

このように、目標②では優れた成果が得られたが、システム開発を進めながらの研究であり、また「京」の利用については、アンサンブル予報のように多数のジョブを同時に流すアプリケーションへの対応が比較的に遅かったために、上記の実験の適用数は数例でしかなく、メンバー数も20-50程度である。今後、計算機性能の向上したポスト「京」が利用できるようになると、事例数やアンサンブルメンバー数の大幅な増加が期待できる。そして、多数のメンバーから提供される情報の処理のために、人工知能の技術も導入されるようになると想像できる。また、これらの手法により、アンサンブル予報の出力から、適用分野ごとに異なる有効な情報を効率よく抽出することができれば、洪水や土石流以外の「太陽光や風力による発電量予測」などのより幅広い用途にも利用されるようになると思われる。このように、領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発は、これからも発展していく研究分野であり、今後も引き続き、ポスト「京」等のプロジェクトで研究・開発を進めていく。

(瀬古 弘)

3.3 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

目標③では、他の目標と異なり特定の集中した目標はなく、モデルの様々な面の改善や、それに関連した基礎研究について、多くの成果を挙げることができた。大規模計算機の特徴を生かしたモデルの様々な面の高度化としては、LESの実行及びそのデータベースを使った乱流パラメタリゼーションモデルの開発・改良と、雲微物理過程モデルのビン法スキームの導入が挙げられる。乱流パラメタリゼーションモデルでは運動エネルギーの粘性消散のための長さスケールのパラメタリゼーションなどを改良した結果、これまで困難とされた中間的な格子間隔のために適当なパラメタリゼーションが開発できた。また、ビン法モデルでは、固体粒子を扱うための多次元ビン法モデルが簡単な設定ではあるが実行され、その有効性が確認され

た。今後、計算機の発展に伴い、より実的なシミュレーションが期待される。

モデルに関連した基礎的な研究としては、「解像度の違いによる収束性、不確定性の研究、湿潤対流、地域気候モデル」などの研究を挙げることができる。細かい格子を使った計算結果を粗い格子で見直すことによって粗い格子でのパラメタリゼーションの改良を行うことは、前述のLESのデータベースを使った乱流パラメタリゼーションモデルの改良と同様の課題だが、湿潤過程が加わることによって問題が複雑になる。地域気候モデルで山岳積雪の解像度依存性を調べた結果で、格子間隔5 kmの結果が観測をうまく表現できていなかったのは、海上で積雲対流パラメタリゼーションがうまく働かず、海上で降らなかったものが山岳中腹で雪として落ちたため、この程度の格子間隔でのパラメタリゼーションの改良が今後も引き続き重要なことを示している。

また、大規模計算機の特徴を生かし、「高解像モデルを使った大気現象の理解」に関係した研究として、台風と竜巻に関する研究が挙げられる。台風に関しては、全域境界層のLES実験での力学的研究、多重眼や多重壁雲の維持メカニズムや、海洋モデルとの結合の研究など様々な観点からの研究が行われ、大規模計算機の威力を実感できるものであった。また、竜巻の構造の変化（1つの渦⇔多重渦）の再現や上昇流の形成要因の研究も、「京」の特徴を生かしたものだといえる。

本研究の目標として、「物理過程のパラメータ化についての基礎研究を通じて、その誤差を評価するとともに、領域モデルの改良につなげる。」という視点が掲げられていたが、実際に5年間を振り返ってみると、物理過程のパラメータ化そのものの改良を進めることと既存のモデルにそれを組み込んで走らせることで手一杯で、誤差評価を行い、それを領域モデルの改良につなげるという面での努力が弱かったという感じがする。また、他目標との協力も不十分であったように思う。今後の研究では、それらの点を考慮して進めるのが重要だと思う。

(中村晃三)

3.4 全体の要約とポスト「京」重点課題

東日本大震災の直後に本格スタートしたHPCI戦略プログラムの分野3「防災・減災に資する地球変動予測」は、2016年3月に予定通り5年間の活動を終了

した。この5年間のプログラム全体の成果についてはその概略が、平成27年度分野3成果報告書（今脇2016）に別途記載されている。また個々の開発についてのより詳しい報告は上記を含む各年度の分野3成果報告書に報告しているほか、主だったものについては前述の戦略分野3ホームページ、および気象学会2015年度秋季大会シンポジウムについての報告（斉藤2016）に参考文献を入れて記述している。

プロジェクト開始当時、夢のように思われたメソ対流系のストームスケールデータ同化やメソアンサンブル予報に基づく豪雨の確率予測、台風や竜巻の微細構造を再現する超高解像度シミュレーションなどが実現したのは本研究の大きな成果であった。その一方で、ストームスケールデータ同化に基づく局地的豪雨の直前予測やリードタイムを持った確率的予測の十分な検証、超高解像度モデル研究に基づいて雲解像モデルの不確定性を評価しアンサンブル解析予測システムへ反映させること、高解像度アンサンブル予報の計算結果を水文モデルに入力して災害の発生そのものを予測していくこと、などは、このプロジェクトでやり残したものになっている。

戦略プログラムの後継課題としての意味合いを持つ

ポスト「京」重点課題「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」（課題代表者：海洋研究開発機構高橋桂子地球情報基盤センター長）が平成28年度から本格スタートしている。この課題は2020年に稼働を目標として開発が進められている「京」の後継機（ポスト「京」）を活用して、気象・気候に関する社会的・科学的に重要な課題の解決を目指す研究を行うものである。サブ課題A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」では、観測ビッグデータの活用、モデルの高度化、アンサンブル予報、局地的極端気象解析システムや土石流予測モデルなどにより、対策のためのリードタイムを長く取れるような気象災害の高精度予測を目指すことになっている（第4図）。戦略プログラムメソ課題で残された宿題はこの課題に引き継がれていくものと期待している。

（斉藤和雄・瀬古 弘）

4. おわりに

HPCI 戦略プログラムでのメソスケール気象予測課題の研究進捗を確認し成果を発信する場として、第1表に示した研究会を開催してきた。ここまで6回の研



第4図 ポスト「京」重点課題4サブ課題A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」の概念図。ポスト「京」重点課題4、ホームページ (<http://www.jamstec.go.jp/pi4/index.html>) より。

究会に講演，挨拶頂いた方々に改めて感謝したい。

今回の研究会の会場とした京都大学宇治キャンパスは京都駅からのアクセスが良好であり，基調講演をしていただいた George Bryan 博士にも京都での滞在を楽しんでいただけたようであった。博士からは，講演ファイルの提供と第3図に掲載した図について，論文未投稿ながら本稿での引用を快く承諾して頂いた。

研究会終了後に懇親会を京都大学宇治キャンパス内の食堂で実施し，参加者の交流を深めることができた。今回の研究会の運営に協力頂いた海洋研究開発機構や京都大学防災研究所の関係者には，事前の準備から当日の実施，事後の各種手続きに至るまで，様々な形でご尽力いただいた。また当日の会場運営にあたっては，京都大学防災研究所暴風雨・気象環境研究分野の研究員・大学院生の有志の皆さんに協力していただいた。関係各位に御礼申し上げるものである。

(斉藤和雄・竹見哲也)

略語一覧

4DVar : 4-dimensional Variational method
 AMSR2 : Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
 CINDY : Cooperative Indian Ocean experiment Year
 DYNAMO : Dynamics of the MJO
 EnVAR : Ensemble Variational method

GCOM-W : Global Change Observation Mission - Water

HPCI : High Performance Computing Infrastructure

JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency

JMA-NHM : Japan Meteorological Agency Nonhydrostatic Model

JRA55 : Japanese 55-year Reanalysis

LES : Large Eddy Simulation

LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter

MJO : Madden Julian Oscillation

NHRCM : Nonhydrostatic Regional Climate Model

NMC 法 : National Meteorological Center 法

RS-AMV : Rapid Scan Atmospheric Motion Vector

XRAIN : eXtended RAdar Information Network

参考文献

今脇資郎，2016：「HPCI 戦略プログラム」成果報告書（平成27年度）分野3：防災・減災に資する地球変動予測。海洋研究開発機構，249pp.

斉藤和雄，2016：「京」によるメソ気象予測研究の最前線。2015年度秋季大会シンポジウム報告。天気，（投稿中）。

斉藤和雄，瀬古 弘，露木 義，中村晃三，坪木和久，2015：第5回超高精度メソスケール気象予測研究会報告。天気，62，649-655.